

УДК 621.787:539.319

Павлов В.Ф., Семёнова О.Ю., Злобин А.С., Киселёв П.Е.

**УЧЁТ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА ПРИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ  
ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Для исследования влияния размеров поперечного сечения на предел выносливости упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах диаметром 10, 25 и 50 мм из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля.

Гладкие образцы подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом при усилии 0,5 кН (ОР1) и 1,0 кН (ОР2). Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,5$  мм. Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Остаточные напряжения в образцах с надрезами вычислялись как аналитическим [2], так и численными методами с использованием программного комплекса Nastran/Patran [3]. Следует отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  в наименьшем сечении образцов с надрезом  $R = 0,5$  мм приведено на рис. 1, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надреза  $\sigma_z^{нов}$  представлены в табл. 1. Можно видеть, что при одной и той же упрочняющей обработке сжимающие остаточные напряжения на поверхности надреза  $\sigma_z^{нов}$  с увеличением диаметра образца увеличиваются. Этот факт объясняется увеличением сжимающих остаточных напряжений и глубины их залегания в упрочнённых гладких образцах с увеличением их диаметра.

Испытания на многоцикловую усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром 10 мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм – на машине УММ-01, диаметром 50 мм – на машине УМП-02; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены

нераспространяющиеся трещины усталости, глубина  $t_{кр}$  которых приведена в табл. 1.

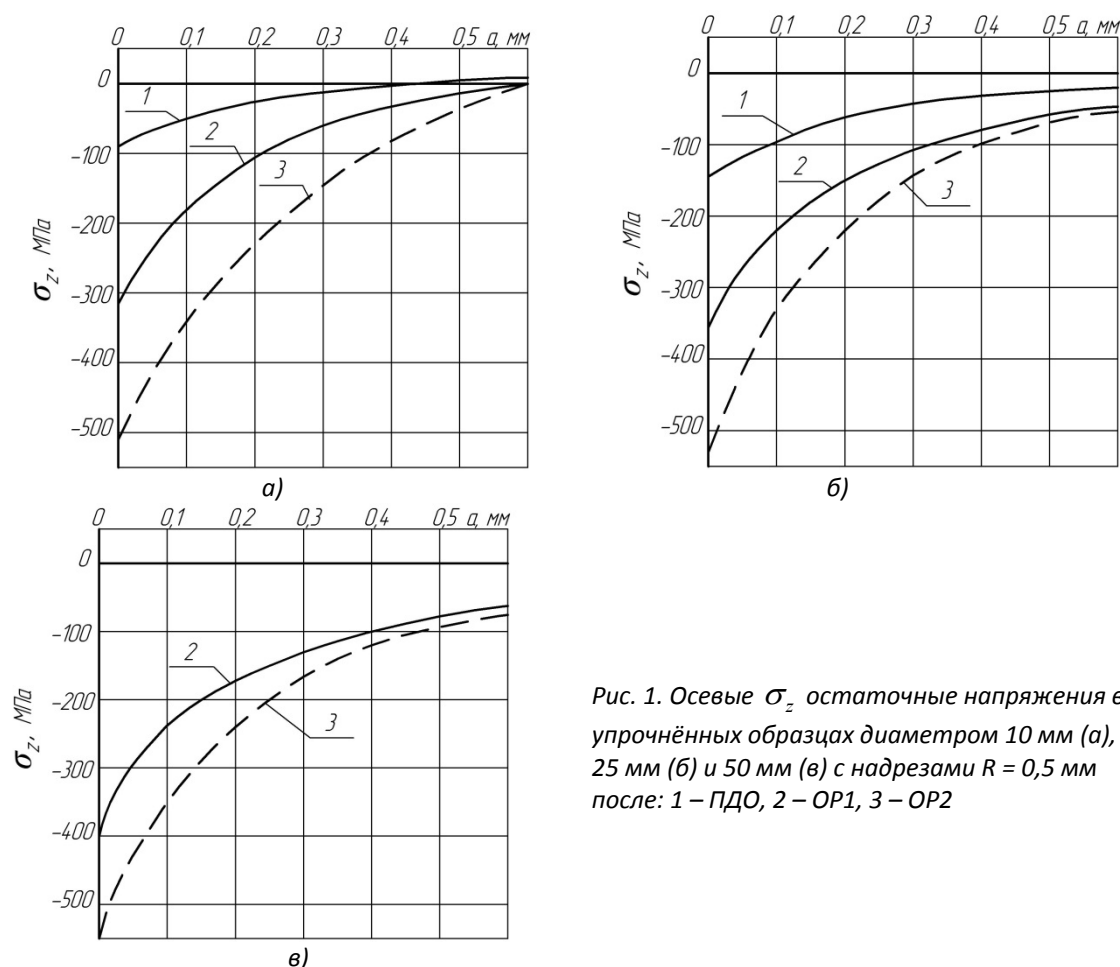


Рис. 1. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в упрочнённых образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) с надрезами  $R = 0,5$  мм после: 1 – ПДО, 2 – ОР1, 3 – ОР2

Из представленных в табл. 1 данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к повышению предела выносливости образцов с надрезом. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с 0,5 кН до 1,0 кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки, результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в образцах с надрезом (рис. 1).

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  образцов с надрезом проводилась по двум критериям: осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза  $\sigma_z^{nos}$  и среднеинтегральным остаточным напряжениям  $\bar{\sigma}_{ocm}$  [4]

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{nos} \right|, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \left| \bar{\sigma}_{ocm} \right|, \quad (2)$$

где  $\psi_\sigma$  и  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критериям  $\sigma_z^{nov}$  и  $\bar{\sigma}_{ост}$ , соответственно.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

$D_1$ , мм	$D$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
			обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{nov}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10	9	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
			ОР1	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
			ОР2	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25	24	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР2	172,5	-525	0,114	0,520	-169	0,355
50	49	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
			ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357

С увеличением диаметра образцов от 10 мм до 50 мм приращение предела выносливости при одних и тех же режимах упрочняющей обработки уменьшается. Это связано с тем, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при увеличении диаметра возрастает незначительно по сравнению с толщиной поверхностного слоя образцов, ответственной за повышение многоциклового усталости и равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения с увеличением диаметра детали следует увеличивать толщину упрочнённого поверхностного слоя (толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями) пропорционально критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости.

Из анализа приведённых в табл. 1 данных видно, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов различного диаметра в условиях концентрации напряжений по критерию  $\sigma_z^{nov}$  – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента  $\psi_\sigma$ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251, то есть изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ . Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  в проведённом

исследовании изменяется от 0,337 до 0,390, составляя в среднем 0,361, и практически не отличается от значения  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленного в работе [5] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений при прогнозировании влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей различного диаметра позволяет учитывать масштабных фактор.

### Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. – 1974. – Вып.1. – С. 88-95.
3. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3 (27). Ч.3. – С. 171-174.
4. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
5. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.